

ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

- Električne mašine (motori i generatori) su uređaji koji pretvaraju električnu energiju u mehaničku i obrnuto.
- Prema vrsti kretanja pokretnog dela, mogu biti obrtne ili linearne.
- Rad električnih mašina zasniva se na četiri osnovna principa delovanja:

1. Elektromagnetno

2. Motorno

3. Generatorsko

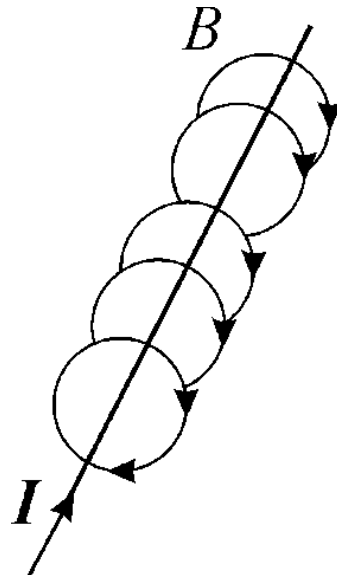
4. Transformatorsko

ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

1. Elektromagnetno delovanje

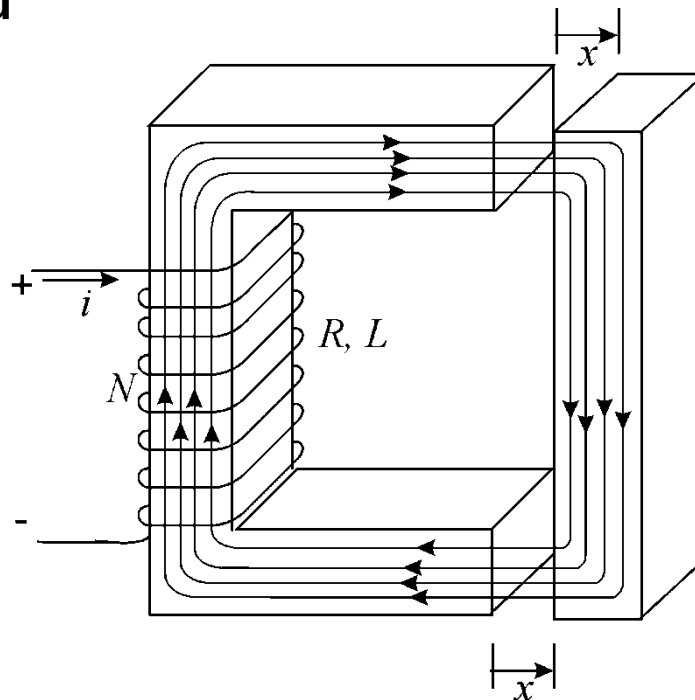
- ✓ Struja koja protiče kroz provodnik izaziva magnetno polje, koje ga okružuje – Bio-Savarov zakon.
- ✓ Uticaj polja na druge provodnike sa strujom i magnete unutar prostora njegovog delovanja - Lorencova i Amperova sila.
- ✓ Kada se promeni smer struje, menja se i smer polja.



ELEKTRIČNE MAŠINE

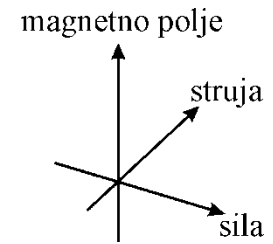
UVOD

- Polje se u električnim mašinama usmerava i njegova jačina povećava (i do nekoliko hiljada puta) prolaskom kroz feromagnetno jezgro.
- ✓ Samoinduktivnost namotaja (kalema) je mera koliko se magnetnog fluksa proizvede po jedinici struje ($L = \Psi / I$).
- ✓ Ukoliko magnetno polje zamišljamo pomoću magnetnih linija sila koje se šire u prostoru, tada je fluks broj linija koji prolazi kroz neku zatvorenu konturu



ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD



2. Motorno delovanje

Na provodnik sa strujom, koji se nalazi u magnetnom polju (koje je proizvedeno drugim strujama ili stalnim magnetom), deluje mehanička sila, normalna i na pravac struje i na pravac polja.

Sila menja smer ako se promeni ili smer struje ili smer polja.

Sila je proporcionalna jačini struje, jačini polja i dužini provodnika: $F=(I \times B) \cdot l$.

U praksi, provodnici se smeštaju u žlebove da bi se sprečilo njihovo smicanje i da bi se oni čvršće fiksirali za masu rotora, na koji moment treba da se prenese. Time je postignuto:

1. Namotaji više ne mogu da se smaknu
2. Smanjen je vazdušni procep, manja magnetska otpornost, a to znači da je za isti fluks manja mps ($\Psi=F/R\mu$)
3. Fluks pretežno prolazi kroz zupce, a ne kroz žlebove, pa je smanjena magnetna indukcija i sila na provodnike koja je sa njom srazmerna.

Dakle, međusobno dejstvo dva polja od kojih jedno potiče od induktora a drugo od indukta, izaziva elektromagnetsku silu na zupce, dok je sila na provodnike zanemarljiva.

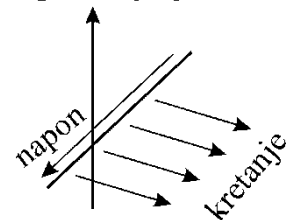
ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

Nije adekvatno tumačiti stvaranje momenta mašine preko Lorencove sile, već stvaranje momenta treba posmatrati kao međusobno dejstvo dva elektromagneta, kao privlačenje raznoimenih i odbijanje istoimenih polova. Dakle, međusobno dejstvo dva polja, jednog koje potiče od induktora, a drugog od indukta izaziva elektromagnetnu silu na zupce, dok je sila na provodnike zanemarljiva.

3. Generatorsko delovanje

- ✓ U električnom provodniku koji se kreće u magnetnom polju indukuje se napon, što se izražava preko indukovane elektromotorne sile (ems).
- ✓ Efekat indukovanja je maksimalan kad su provodnik, kretanje i polje međusobno normalni: $E=(v \times B) \cdot l$.
- ✓ U svim električnim mašinama, bez obzira da li rade kao generatori ili motori, u većini radnih režima, namotaj rotora se kreće i kroz njega protiče struja. Zbog toga su generatorsko i motorno delovanje nerazdvojivi i javljaju se istovremeno.



ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

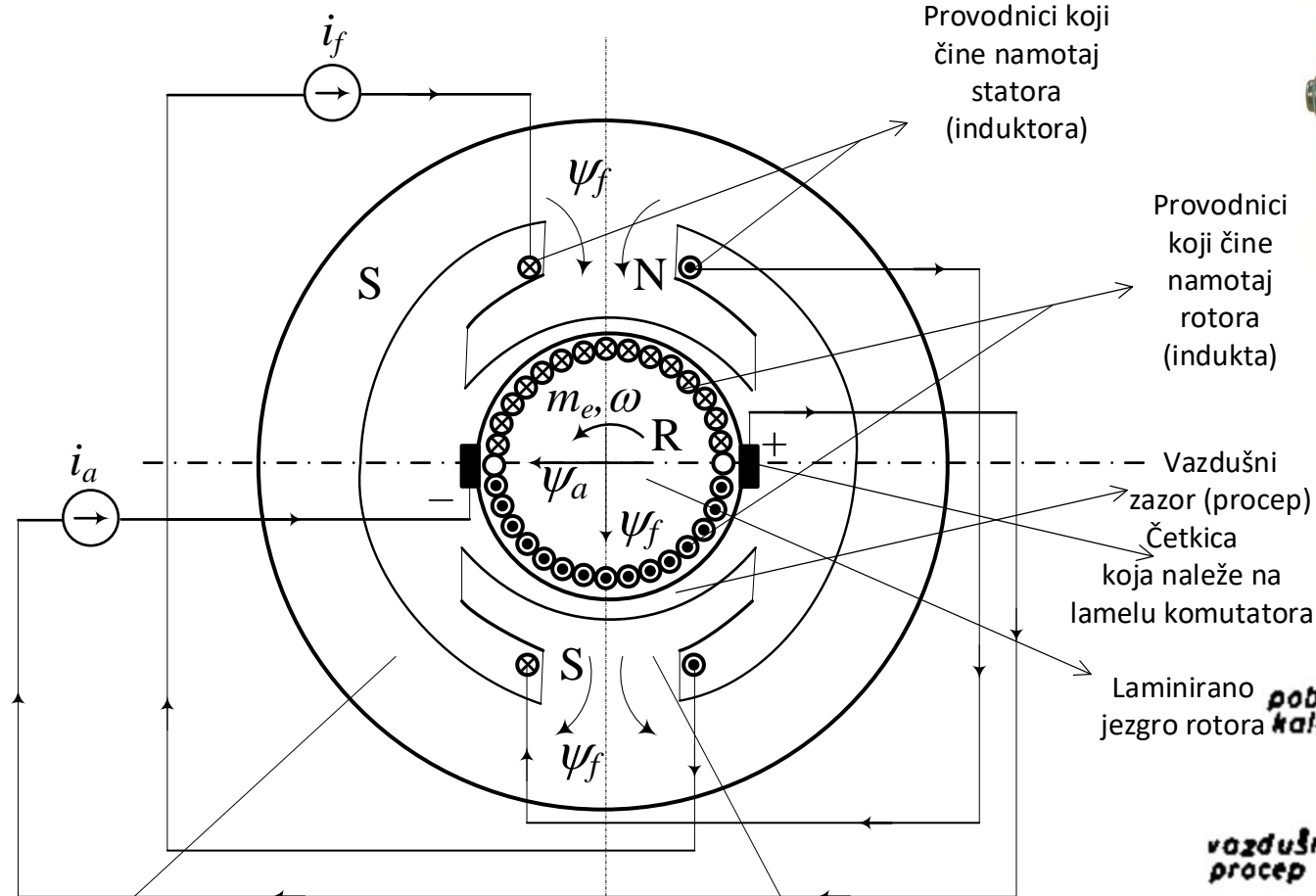
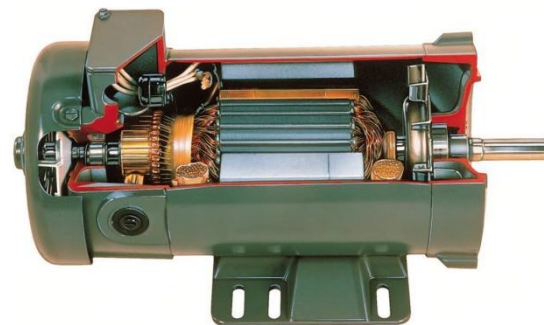
4. Transformatorsko delovanje

- ✓ Promenljiva struja (iz naizmeničnog ili impulsnog naponskog izvora) koja protiče kroz namotaj (kalem) stvara magnetno polje čiji se polaritet i amplituda menjaju u vremenu.
- ✓ Takvo magnetno polje indukuje napon (ems) u svakom namotaju koji obuhvati. Amplituda indukovane ems zavisi od međusobne induktivnosti između namotaja i brzine promene struje namotaja koji proizvodi magnetno polje.

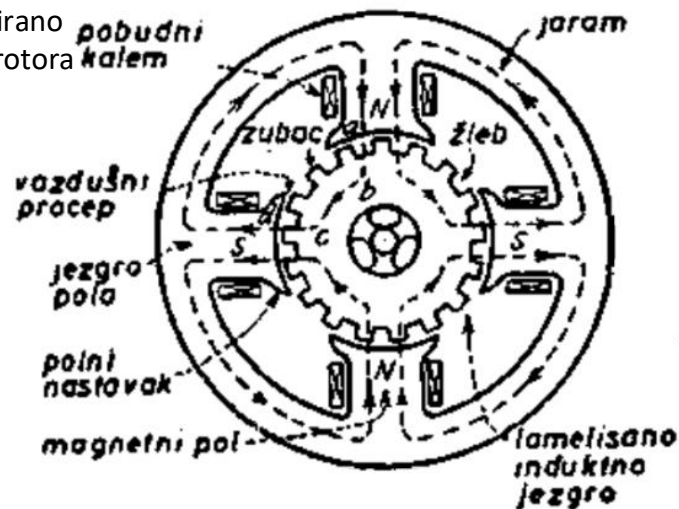
$$V_2 = L_{12} \frac{di_1}{dt}$$

MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

Poprečni presek motora:

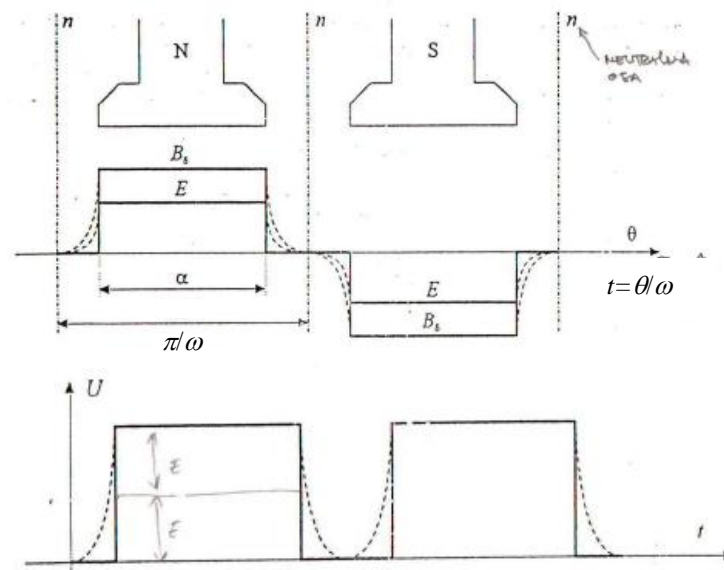
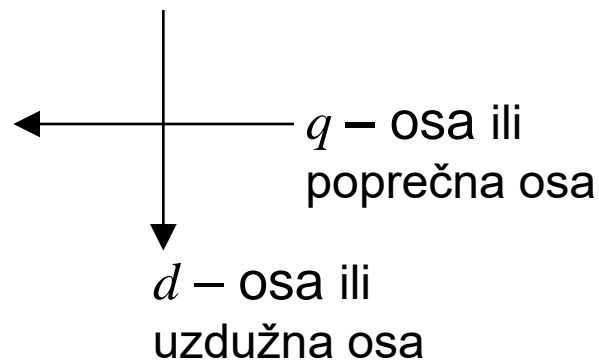
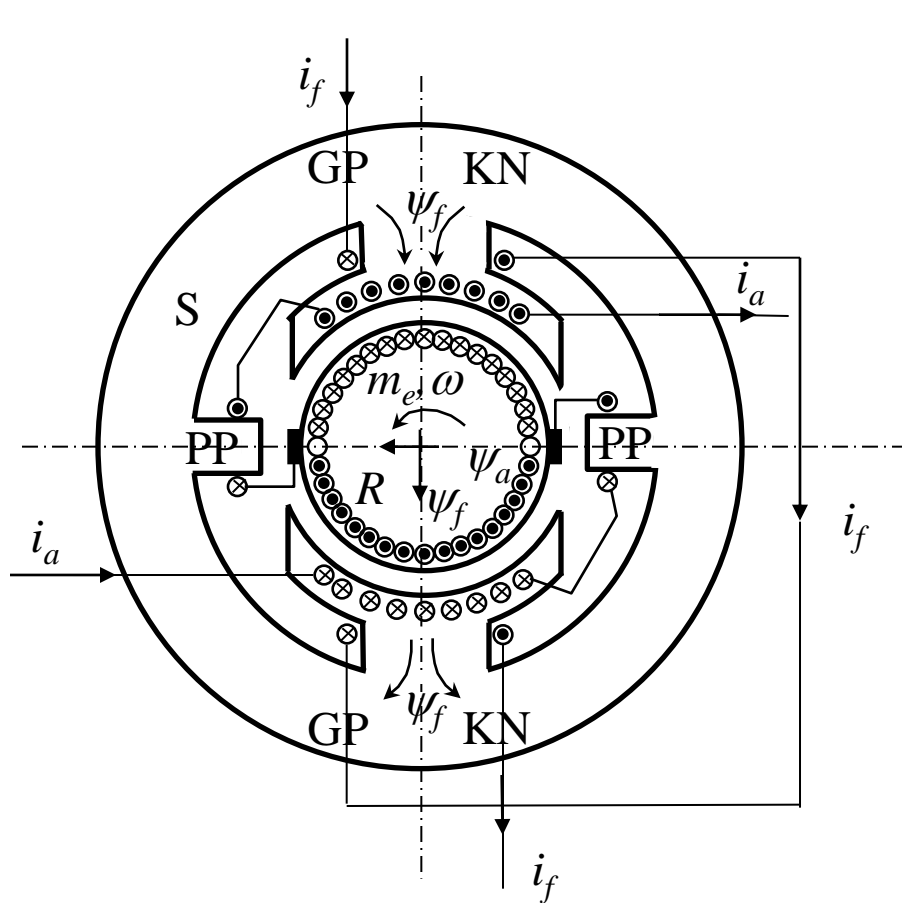


Osnovni delovi:
 S – stator;
 N, S – glavni polovi sever i jug;
 R – rotor;



MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

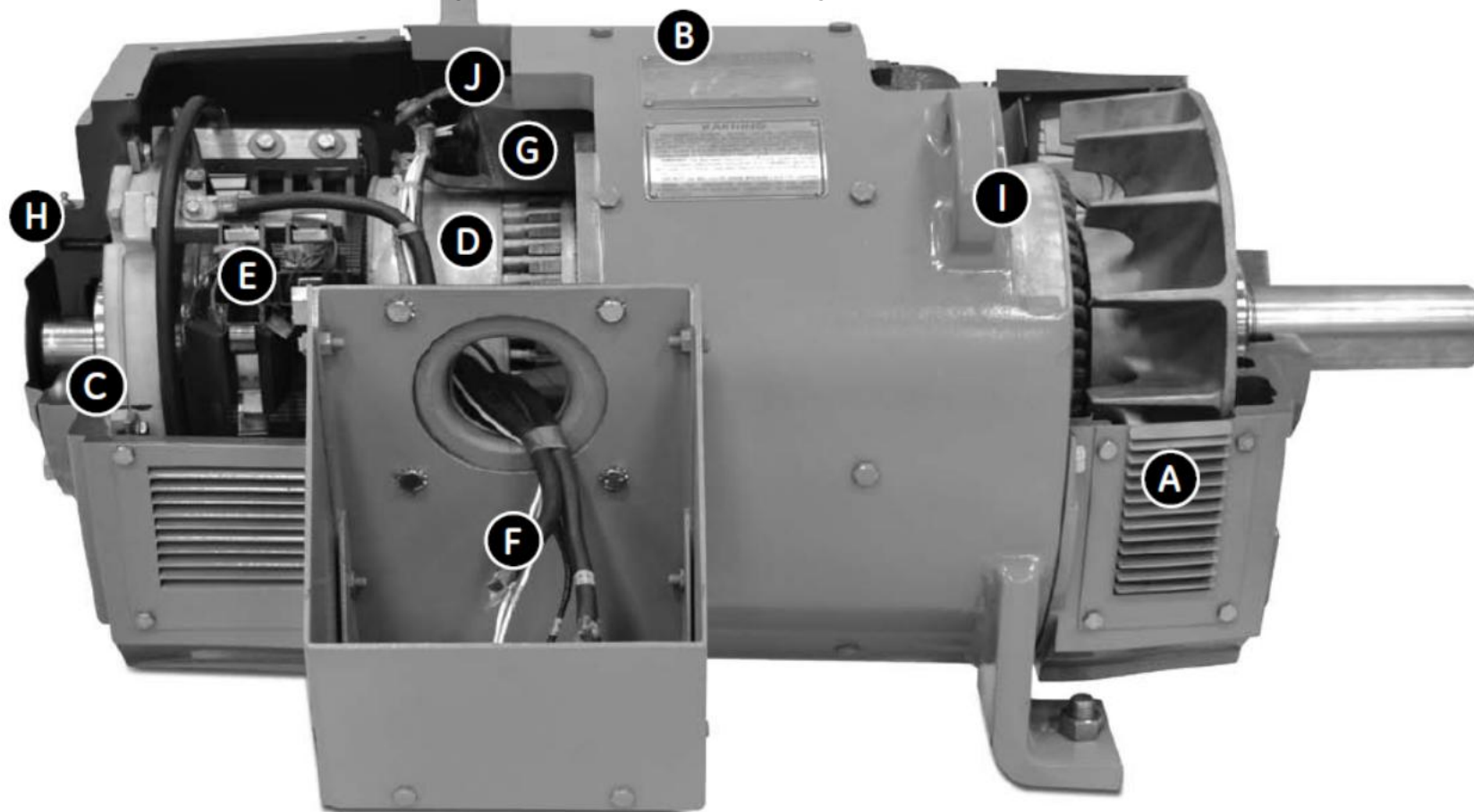
Poprečni presek motora za jednosmernu struju:



Osnovni delovi:

- S – stator;
- R – rotor;
- GP – glavni polovi; PP – pomoćni polovi;
- KN – kompenzacioni namotaj.

Osnovni delovi motora za jednosmernu struju



A – Poklopac

B – Kućište

C – Ležaj

D – Rotor (armatura)

E – Držać četkice

F – Priključna kutija

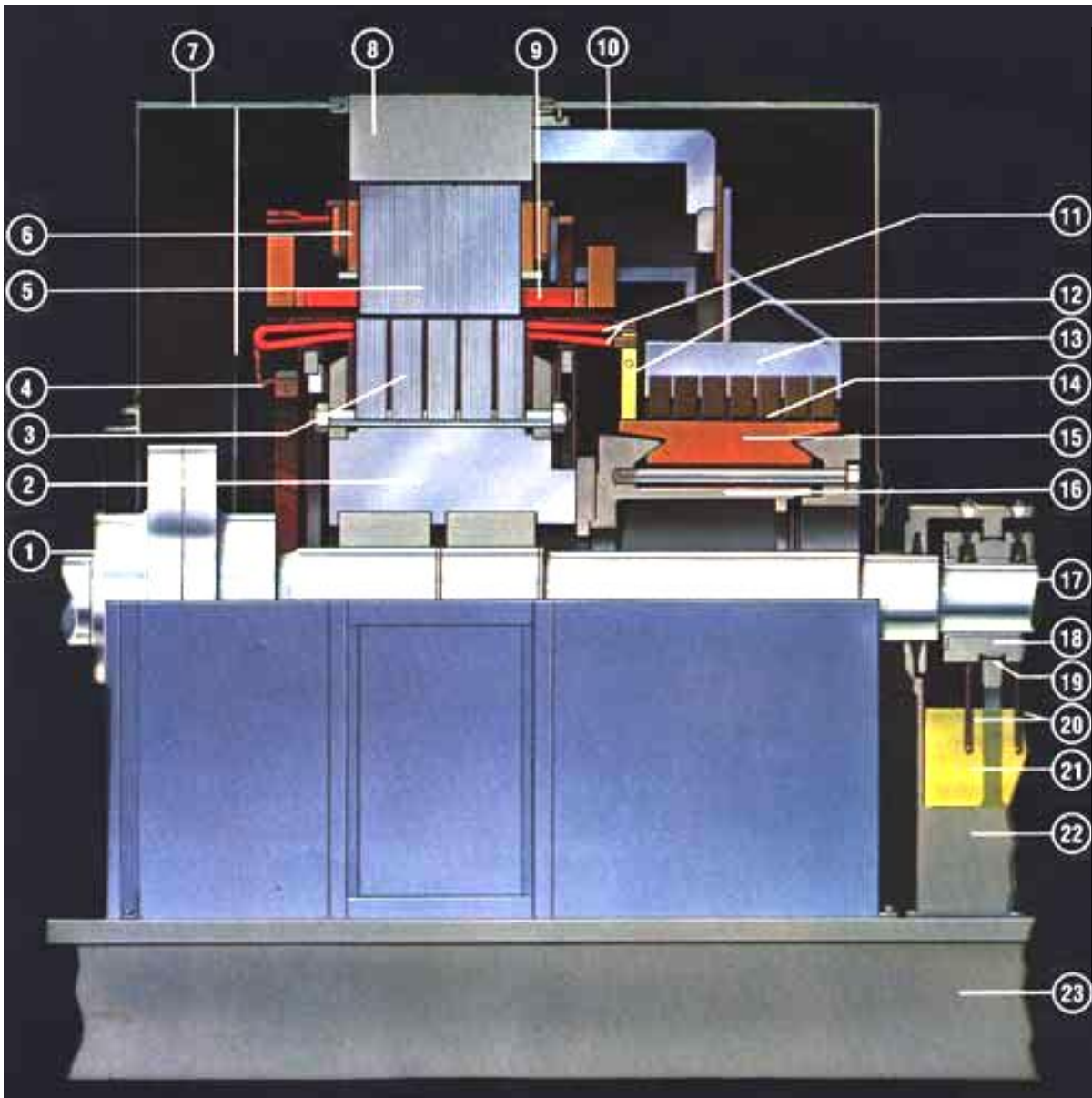
G – Izolacija

H – Poklopac na komutatorskom kraju (za montažu dodatne opreme)

I – Oslonac za podizanje

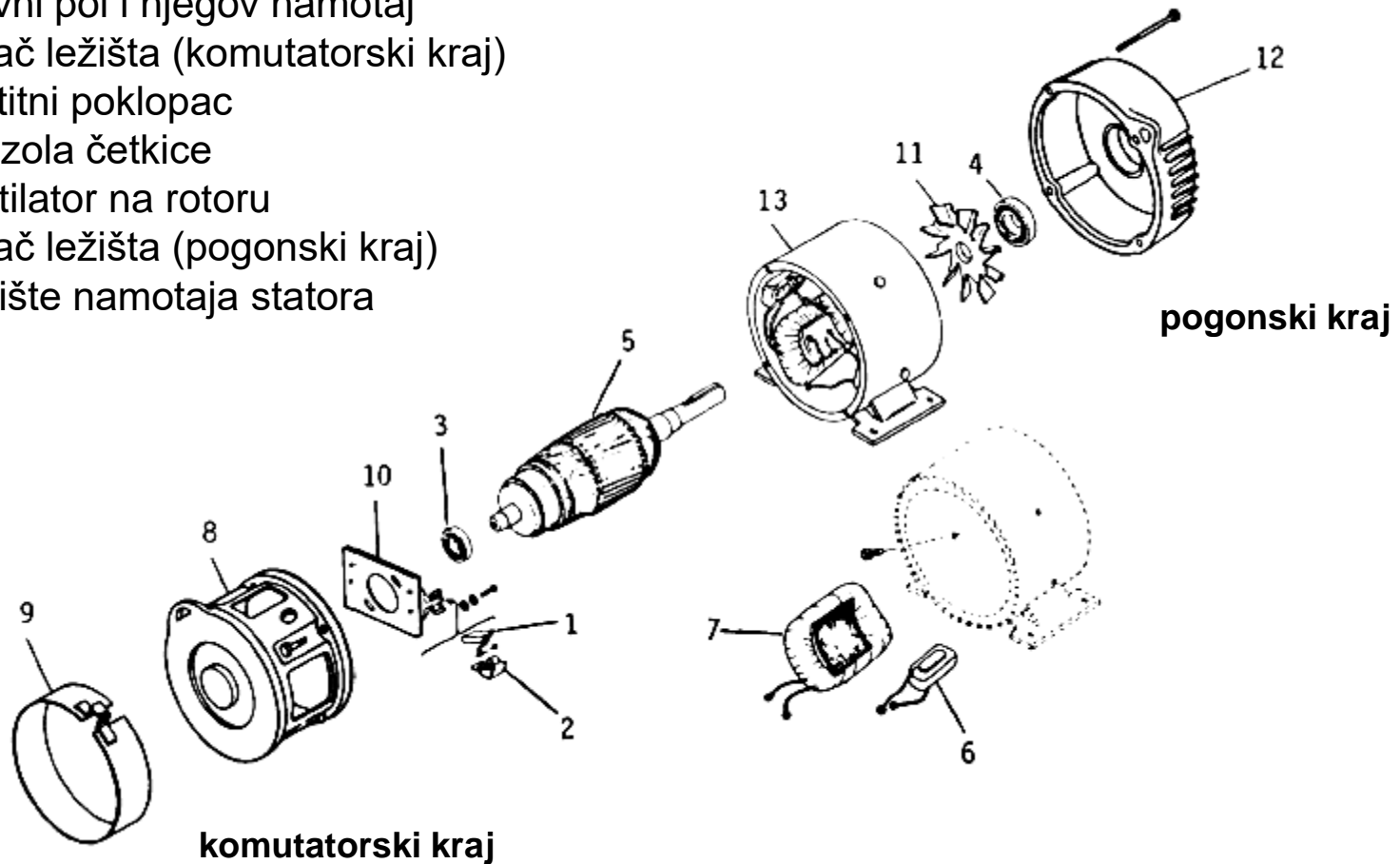
J - Namotaj

Slike motora za jednosmernu struju

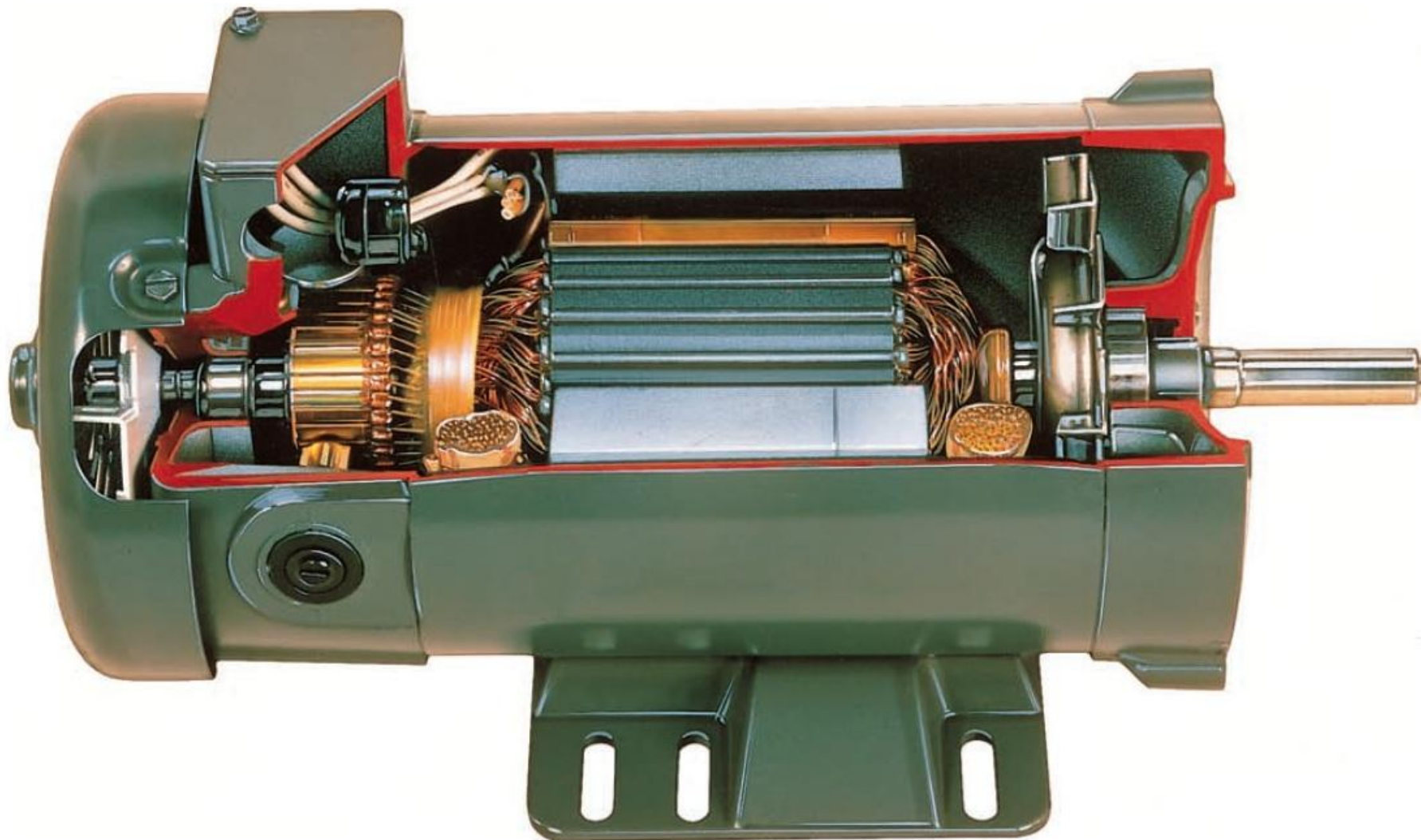


- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Mehanička spojnica | 13. Držač četkica |
| 2. Rotorska zvezda | 14. Četkice |
| 3. Limovi rotora | 15. Kolektorska kriška |
| 4. Poprečne veze rotora | 16. Držač kriški |
| 5. Glavni pol | 17. Vratilo |
| 6. Namotaj glavnog pola | 18. Ležaj |
| 7. Pokretni spoljni poklopac | 19. Ležište ležaja |
| 8. Kućište | 20. Prstenovi za podmazivanje |
| 9. Kompenzacioni namotaj | 21. Rezervoar ulja |
| 10. Držači četkica na kućištu | 22. Postolje |
| 11. Namotaj rotora | 23. Noseća ploča |
| 12. Spoj namotaja rotora sa kolektorom | |

1. Četkice
2. Opruge četkica
3. Ležaj na komutatorskom kraju
4. Ležaj na pogonskom kraju
5. Rotor (armatura)
6. Pomoćni pol sa namotajem
7. Glavni pol i njegov namotaj
8. Držać ležišta (komutatorski kraj)
9. Zaštitni poklopac
10. Konzola četkice
11. Ventilator na rotoru
12. Držać ležišta (pogonski kraj)
13. Kućište namotaja statora



Slike motora za jednosmernu struju





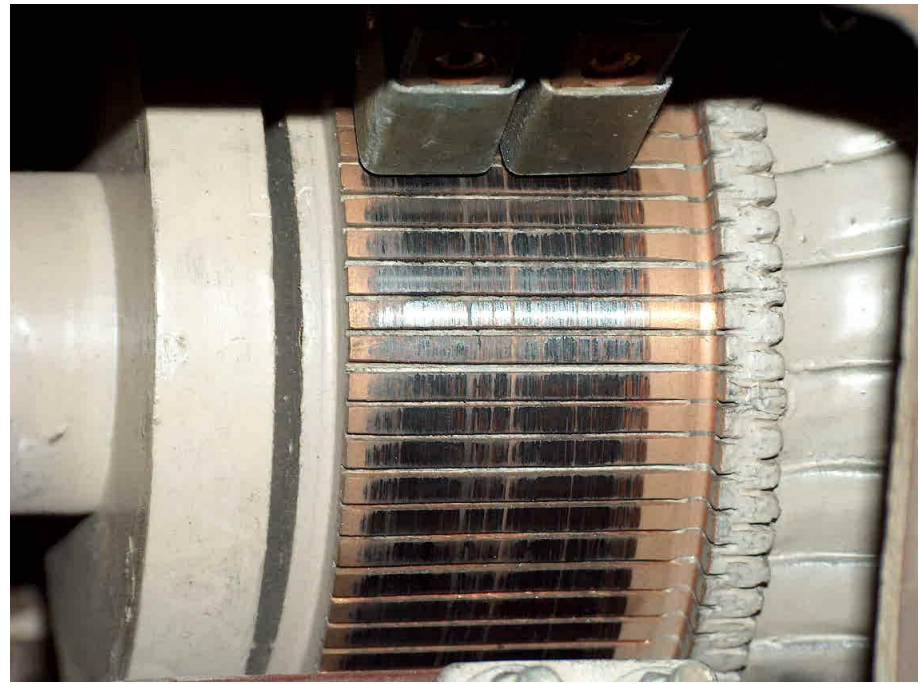


РСФСР
ИЗЪЯСКИИ СОВНАРХОЗ
УИП
№ В _____ ОД _____
КВТ _____ В
А _____ В
ОБ/МИН ВЕС _____ КГ
ГОСТ _____ 196 _____ Г

СДЕЛАНО В СССР

Terminal block with six screws and three black knobs. The knobs are labeled with Cyrillic characters: 'В', 'А', and 'С'.





MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

primena

- MJS su dominirali u oblasti primene pogona sa promenljivom brzinom preko jednog veka, a i danas predstavljaju vrlo čest izbor ako se zahteva rad regulisanog elektromotornog pogona u vrlo širokom opsegu brzina. To je posledica njihovih odličnih radnih karakteristika i karakteristika upravljanja.

-Jedna njihova bitna mana je mehanički komutator, koji predstavlja ograničenje u pogledu snage i brzine motora, utiče na povećanje inercije i aksijalne dužine i zahteva periodično održavanje.

- Drugi ozbiljan problem, koji nastaje zbog prirode konstrukcije MJS, je hlađenje. Praktično sva električna snaga prolazi kroz namotaj rotora, te i većina gubitaka nastaje u rotoru. Motori zatvorene konstrukcije se hlade prisilnom ventilacijom spoljnog oklopa, a prenos toplotne energije sa rotora na stator se rešava unutrašnjim ventilatorom. Kako se ovim načinom toplotna energija teže odvodi iz rotora, ne može se postići povoljna snaga motora za datu veličinu motora. Ako se motor hladi direktnom prisilnom ventilacijom kroz vazdušni procep, mora biti otvorenije konstrukcije pa vlaga, prašina i razne ostale materije mogu dospeti u motor i izazvati probleme, pogotovo na četkicama i u ležajevima.

- Kod motora za naizmjeničnu struju koji se napajaju iz energetske pretvarača, eliminisan je komutator po cenu složenijeg upravljanja (dok se nisu dovoljno razvile i dok nije dovoljno pala cena komponenti energetske elektronike, nisu mogle motori za NS da zamene MJS).

MOTOR ZA JEDNOSMERNE STRUJE SA STALNIM MAGNETOM

- Pobudni namotaj statora može se zameniti stalnim magnetima, koji obezbeđuju magnetisanje celog magnetnog kola.
- Klasični feritni i Al-Ni-Co magneti daju srednju jačinu magnetnog polja i već decenijama se koriste u manjim motorima.
- U poslednjih dve decenije, nova tehnologija magneta od tzv. retkih zemalja (Samarijum-Cobalt i Neodimijum-Bor-Fe), omogućila je dostizanje većih jačina magnetnog polja i vrlo visoke gustine magnetne energije. Ovi magneti su stoga manji po zapremini pa je cena ugradnje prihvatljiva. Prednost ovih magneta je što je nepoželjno razmagnetisavanje, koje se može javiti pri startu i pri kvarovima, praktično nemoguće. Loša strana primene je visoka cena magneta, ali zbog postizanja jačeg magnetnog polja ceo motor postaje manji (za istu snagu), što ublažava porast cene.
- Stalni magneti su pogodni za motore malih snaga, gde je izrada i ugradnja malih pobudnih namotaja komplikovana i relativno skupa. Moderni magneti su idealni za servo-motore, gde su neophodne visoke dinamičke performanse:
 - otpor i induktivnost rotora su vrlo mali pa se omogućavaju vrlo brze promene struje tj. momenta.
 - smanjene dimenzije rotora, pogotovo pri specijalnim konstrukcijama rotora, omogućuje izradu mašina sa izuzetno malim momentom inercije, što doprinosi postizanju visokih ubrzanja i usporenja.
 - mehaničke karakteristike motora sa stalnim magnetima slične su karakteristikama motora sa nezavisnom pobudom.

MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

primena

- Mašine za jednosmernu struju (MJS) su vrlo rasprostranjene. Često se koriste za elektromotorne pogone promenljive brzine, zbog vrlo jednostavne regulacije brzine. Iako su druge vrste motora u poslednjih nekoliko decenija postale ozbiljan konkurent za upotrebu u pogonima promenljive brzine, MJS se i dalje koriste u sledećim oblastima:

a) mali napon:

automobili i ostala drumska vozila (anlaser, brisači, ventilacija kabine, podizači prozora, pomeranje sedišta),

uređaji kućne elektronike i zabave (DVD i CD plejeri, računari), igračke.

b) srednji i viši napon:

električna vuča (trolejbusi, tramvaji, vozovi, viljuškari i unutrašnji transport).

c) 1. Motori za valjaoničke pogone: u industriji čelika i aluminijuma. Obično rade na malim brzinama i konstruisani su da rade sa konstantnim momentom u širokom opsegu brzina (4:1).

2. Dizalični pogoni u rudnicima (podzemni kopovi) za transport ruda i ljudi na površinu.

3. Motori u teškoj industriji, za velike snage (industrial duty motors) – pogoni ventilatora, miksera, ekstrudera i drugi pogoni koji zahtevaju veliki momenat ili promenljivu brzinu.

4. Motori za pogon brodova (heavy duty motors, ali obezbeđuju super tihi rad): ledolomaca, podmornica, tegljači, remorkeri,...

5. Motori za specijalne namene: dinamički simulator letenja, mašine za proveru centriranosti rotacionih delova drugih mašina, dinamometri...**Svuda gde se traži veliki momenat, veliko ubrzanje i mala ili promenljiva brzina.**

- Vodeći proizvođači: ABB, Siemens, TECO-Westinghouse, General Electric, Baldor (member of ABB group)

(npr. General Electric (GE):

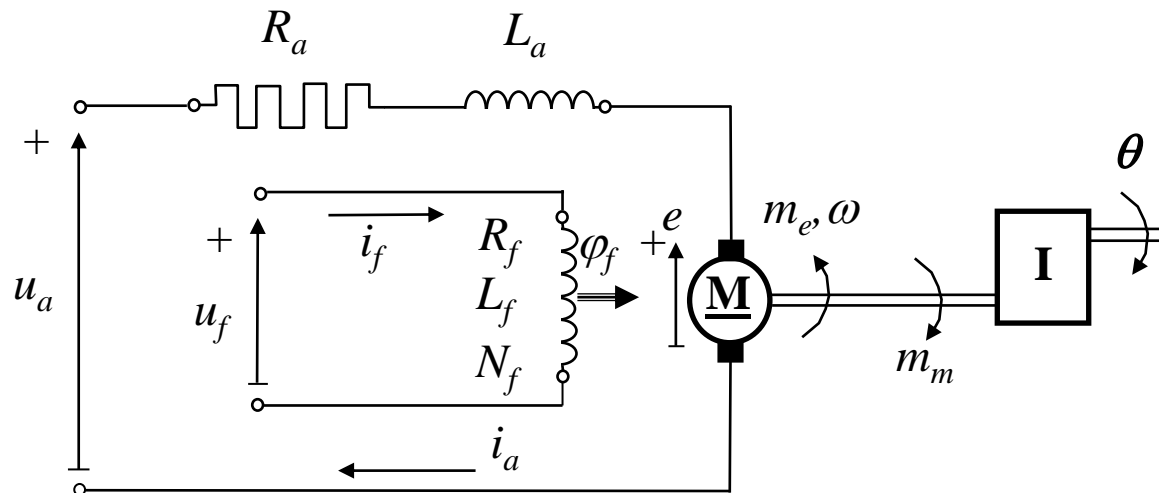
Proizvodi MJS u rasponu snaga od 0.75kW do 2250kW (pa čak i 26000kW), u kućištima koji pružaju mogućnost zaštite od kapanja, curenja i prskanja vode, potpuno oklopljeni motori i motori za korišćenje u eksplozivnim sredinama).

- Osobine:**
- **pogodne mehaničke karakteristike;**
 - **jednostavno upravljanje;**
 - **složena konstrukcija (komutator);**
 - **potrebno periodično održavanje;**
 - **mala preopteretljivost (kompenzacioni namotaj) ;**
 - **ograničena maksimalna brzina.**

POGON SA MOTOROM ZA JEDNOSMERNU STRUJU

NEZAVISNA POBUDA

Uprošćena, principijelna šema:



Motor, reduktor, opterećenje.

opterećenje (valjak)

reduktor

motor za jednosmernu struju



Matematički model, sistem jednačina:

diferencijalne jednačine:

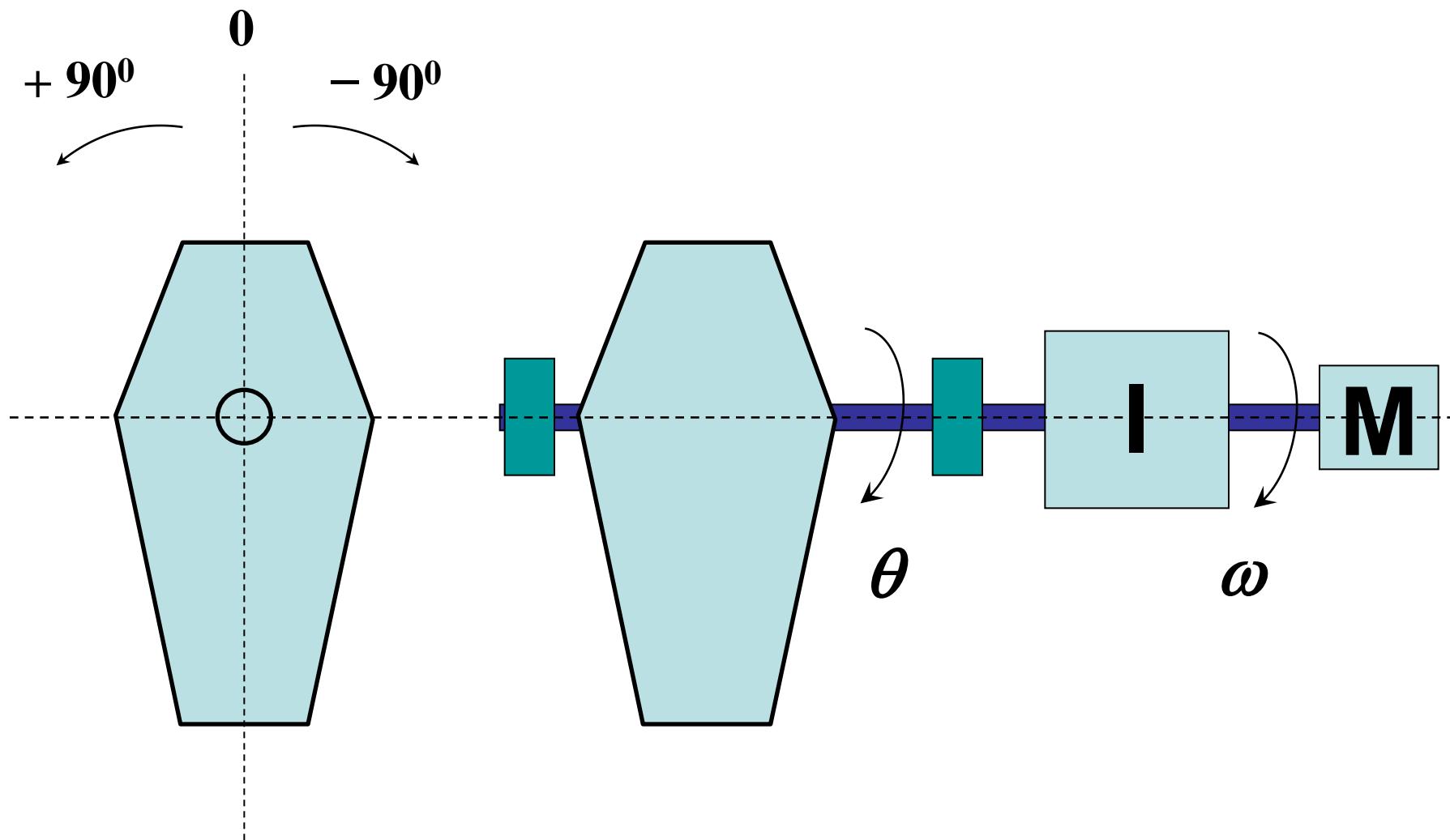
$$L_a \frac{di_a}{dt} = u_a - e - R_a i_a \quad (1)$$

$$\frac{d[L_f(i_f) \cdot i_f]}{dt} = c \frac{d\varphi_f}{dt} = u_f - R_f i_f \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_e - m_m - k_\omega \omega - k_\theta \theta \quad (3)$$

$$I \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

Konvertor za čelik – objašnjenje zavisnosti momenta opterećenja od pozicije



Konvertor za čelik – objašnjenje zavisnosti momenta opterećenja od pozicije



Matematički model, sistem jednačina:

diferencijalne jednačine:

$$L_a \frac{di_a}{dt} = u_a - e - R_a i_a \quad (1)$$

$$\frac{d[L_f(i_f) \cdot i_f]}{dt} = c \frac{d\varphi_f}{dt} = u_f - R_f i_f \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_e - m_m \quad (3)$$

$$I \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

Možemo smatrati da se moment opterećenja sastoji od stalne vrednosti m_0 i promenljive vrednosti srazmerne trenju.

$$m_m = m_0 + k_\omega \omega$$

algebarske jednačine:

$$e = c \cdot \varphi_f \cdot \omega = \psi_f \cdot \omega$$

ψ_f - "ukupan fluks"

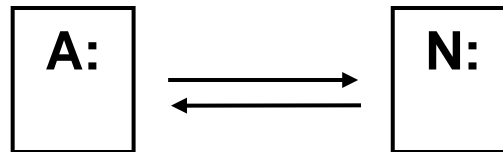
$$m_e = c \cdot \varphi_f \cdot i_a = \psi_f \cdot i_a$$

$$\psi_f = c \cdot \varphi_f = f(i_f) = L_f(i_f) \cdot i_f \quad \text{Karakteristika magnećenja}$$

$\psi_f \approx L_f \cdot i_f$ - kada je mašina nezasićena

NORMALIZACIJA

- uprošćenje jednačina;
- eliminacija dimenzija svih veličina osim vremena;
- svođenje vrednosti svih veličina na isti nivo nezavisno od snage motora.



A: - apsolutni domen;

N: - normalizovani domen.

Postupak normalizacije:

$$x_* = \frac{x}{x_b}$$

indeksi:

- * normalizovana vrednost veličine x ;
- b bazna vrednost za veličinu x .

Napomena: Indeks "*" se može izostaviti ako su sve veličine u izrazu normalizovane, ali se tada to mora naglasiti sa oznakom "N:". U mešovitim izrazima indeks "*" je obavezan.

A: *Jednačine i izrazi u apsolutnom domenu.*

N: *Jednačine i izrazi u normalizovanom domenu.*

Bazne vrednosti
osnovne (usvojene):

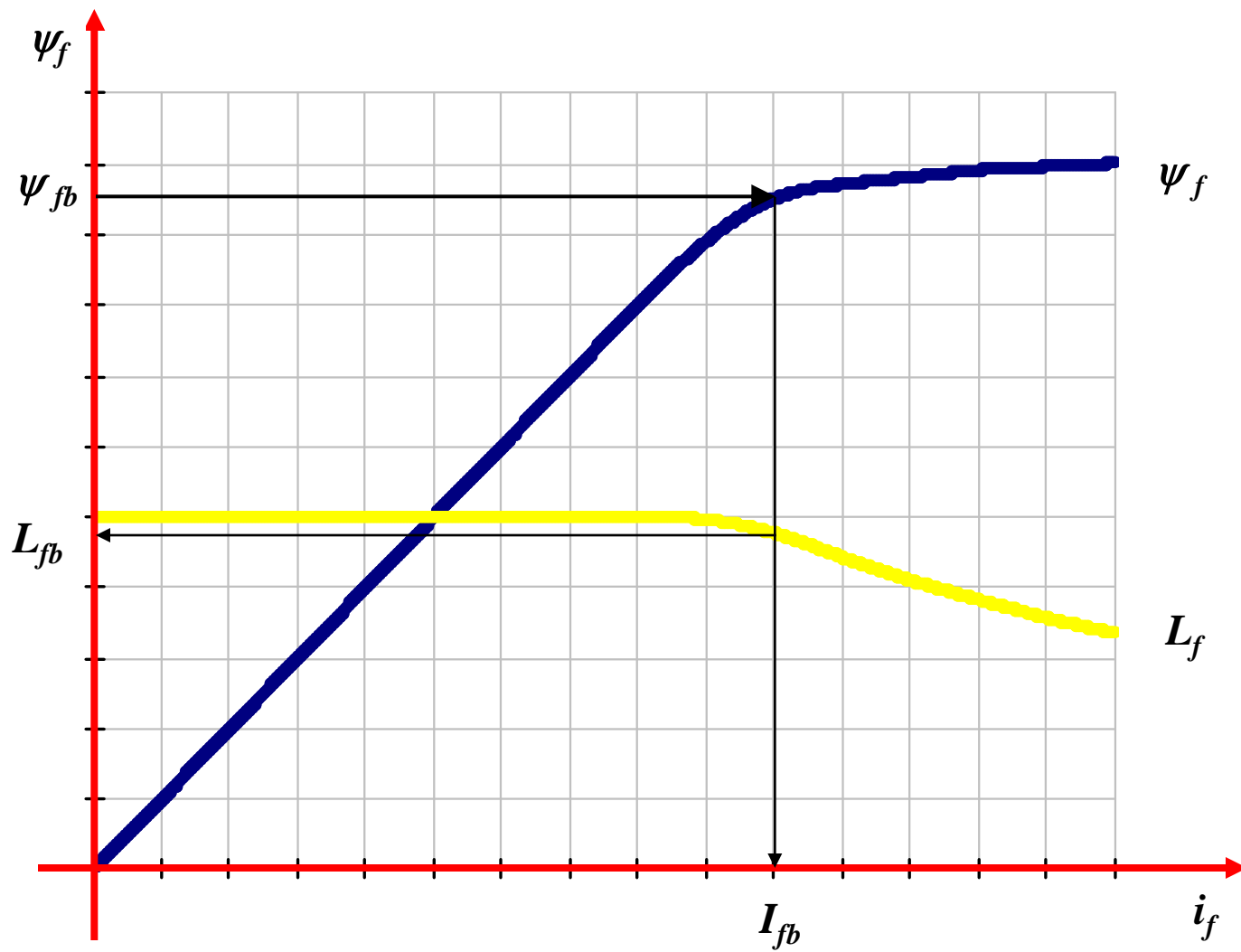
$$U_{ab} = U_{anom}; \quad I_{ab} = I_{anom}; \quad \omega_b = \omega_{nom};$$

izvedene:

$$R_{ab} = \frac{U_{ab}}{I_{ab}}; \quad \psi_b = \frac{U_{ab}}{\omega_b}; \quad \psi_b = c \cdot \varphi_b; \quad M_b = c \cdot \varphi_b \cdot I_{ab};$$

$$I_{fb} = f^{-1}(\psi_b); \quad L_{fb} = L_f(I_{fb}); \quad R_{fb} = R_f; \quad U_{fb} = R_{fb} \cdot I_{fb}$$

Karakteristika magnećenja



NORMALIZACIJA MATEMATIČKOG MODELA POGONA

$$\text{Jednačina (1) } U_{ab} = R_{ab} \cdot I_{ab} = c \cdot \varphi_b \cdot \omega_b = \psi_b \cdot \omega_b$$

$$\frac{L_a}{R_a} \frac{R_a}{R_{ab}} \frac{d}{dt} \left(\frac{i_a}{I_{ab}} \right) = \frac{u_a}{U_{ab}} - \frac{c \cdot \varphi_f \cdot \omega}{c \cdot \varphi_b \cdot \omega_b} - \frac{R_a}{R_{ab}} \frac{i_a}{I_{ab}}$$

$$T_a \cdot R_{a^*} \frac{d}{dt} (i_{a^*}) = u_{a^*} - \varphi_{f^*} \cdot \omega_* - R_{a^*} \cdot i_{a^*}$$


$$\xrightarrow{\varphi_{f^*} = \psi_{f^*}}$$

$$T_a \frac{di_{a^*}}{dt} = \frac{1}{R_{a^*}} (u_{a^*} - \psi_{f^*} \cdot \omega_*) - i_{a^*}$$

T_a - elektromagnetna vremenska konstanta indukta.

Jednačina (2) / $U_{fb} = I_{fb} \cdot R_{fb}$

$$\frac{L_{fb}}{R_f} \frac{d}{dt} \left(\frac{L_f(i_f)}{L_{fb}} \frac{i_f}{I_{fb}} \right) = \frac{c \cdot \varphi_b}{U_{fb}} \frac{d}{dt} \left(\frac{\varphi_f}{\varphi_b} \right) = \frac{u_f}{U_{fb}} - \frac{R_f \cdot i_f}{R_f \cdot I_{fb}}$$

$$T_f \frac{d[L_{f^*}(i_{f^*}) \cdot i_{f^*}]}{dt} = T_f \frac{d\psi_{f^*}}{dt} = u_{f^*} - i_{f^*}$$


Kada je mašina nezasićena:

$$\frac{L_{f^*}(i_{f^*})}{I_{f^*}} = 1 \rightarrow !!!$$

T_f – elektromagnetna vremenska konstanta pobude (induktora).

Jednačina (3) / $M_b = c \cdot \varphi_b \cdot I_{ab} = \psi_b \cdot I_{ab}$

$$\frac{J \cdot \omega_b}{M_b} \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{\omega_b} \right) = \frac{\psi_f \cdot i_a}{\psi_b \cdot I_{ab}} - \frac{m_m}{M_b}$$

$$T_m \frac{d\omega_*}{dt} = \psi_{f*} \cdot i_{a*} - m_{m*}$$

$$m_m = m_0 + k_\omega \cdot \omega; \quad \frac{m_m}{M_b} = \frac{m_0}{M_b} - \frac{k_\omega \cdot \omega_b}{M_b} \frac{\omega}{\omega_b}; \quad m_{m*} = m_{0*} - k_{\omega*} \omega_*$$

T_m – mehanička vremenska konstanta pogona.

Jednačina (4) / ω_b

$$\frac{I \cdot \theta_b}{\omega_b} \frac{d}{dt} \left(\frac{\theta}{\theta_b} \right) = \frac{\omega}{\omega_b}$$

$$T_\theta \frac{d\theta_*}{dt} = \omega_*$$

Priroda veličine θ (položaj) dozvoljava proizvoljno biranje njene bazne vrednosti.

Za izabrano:

$$\theta_b = \omega_b / I$$

dobija se:

$$T_\theta = 1 \text{ s}$$

STATIKA

$$\frac{d(\quad)}{dt} = 0$$

STATIČKE KARAKTERISTIKE POGONA SA NEZAVISNO POKRETNIM JEDNOSMERNIM MOTOROM

Jednačine (1), (2) i (3) u stacionarnom stanju:

A:

$$u_a = \psi_f \cdot \omega + R_a \cdot i_a$$

$$u_f = R_f \cdot i_f = R_f \cdot f^{-1}(\psi_f)$$

$$m_e = \psi_f \cdot i_a = m_m$$

Iz jednačine (4) u stacionarnom stanju sledi:

$$\omega = 0 !!$$

Specijalni slučaj!!!

U normalizovanom domenu:

N:

$$u_a = \varphi_f \cdot \omega + R_a \cdot i_a = \psi_f \cdot \omega + R_a \cdot i_a$$

$$u_f = i_f = f^{-1}(\psi_f)$$

$$m_e = \psi_f \cdot i_a = m_m$$

U nominalnom režimu:

N:

$$U_{an} = 1; \quad I_{an} = 1; \quad \omega_n = 1 .$$

Iz jednačine (1) se dobija:

$$1 = \psi_{fn} + R_{an} \rightarrow !!! \quad R_{an} - \text{sopstveni otpor indukta.}$$

$$\varphi_{fn} = \psi_{fn} = 1 - R_{an} < 1 !!!$$

U praksi je:

A:

$$R_{an} \ll R_{ab} = U_{ab} / I_{ab} = U_{an} / I_{an}$$

$$R_{an*} \approx 0$$

Kod manjih motora je R_{an*} veće, a kod većih motora je manje.

Sada se može napisati:

N:

$$\varphi_{fn} = \psi_{fn} \approx 1 \quad \text{ali} \quad < 1 \quad !!!$$

Takođe važi:

$$m_{en} = \varphi_{fn} = \psi_{fn} < 1$$

Iz jednačina koje važe u stacionarnom stanju dobijaju se analitički izrazi za statičke karakteristike motora - pogona.

$$\mathbf{N:} \quad \omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f} i_a = \omega_0 - \Delta\omega$$

ω_0 – brzina idealnog praznog hoda

$\Delta\omega$ – promena brzine usled opterećenja

$$m_e = m_m = \psi_f \cdot i_a$$

Takodje, dobija se i **MEHANIČKA KARAKTERISTIKA:**

$$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} m_m \quad \text{ili} \quad \omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} m_e$$

UTICAJ DODATOG OTPORA U KOLU INDUKTA NA STATIČKE KARAKTERISTIKE

N:

$$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a + R_{ad}}{\psi_f^2} m_e$$

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega'$$

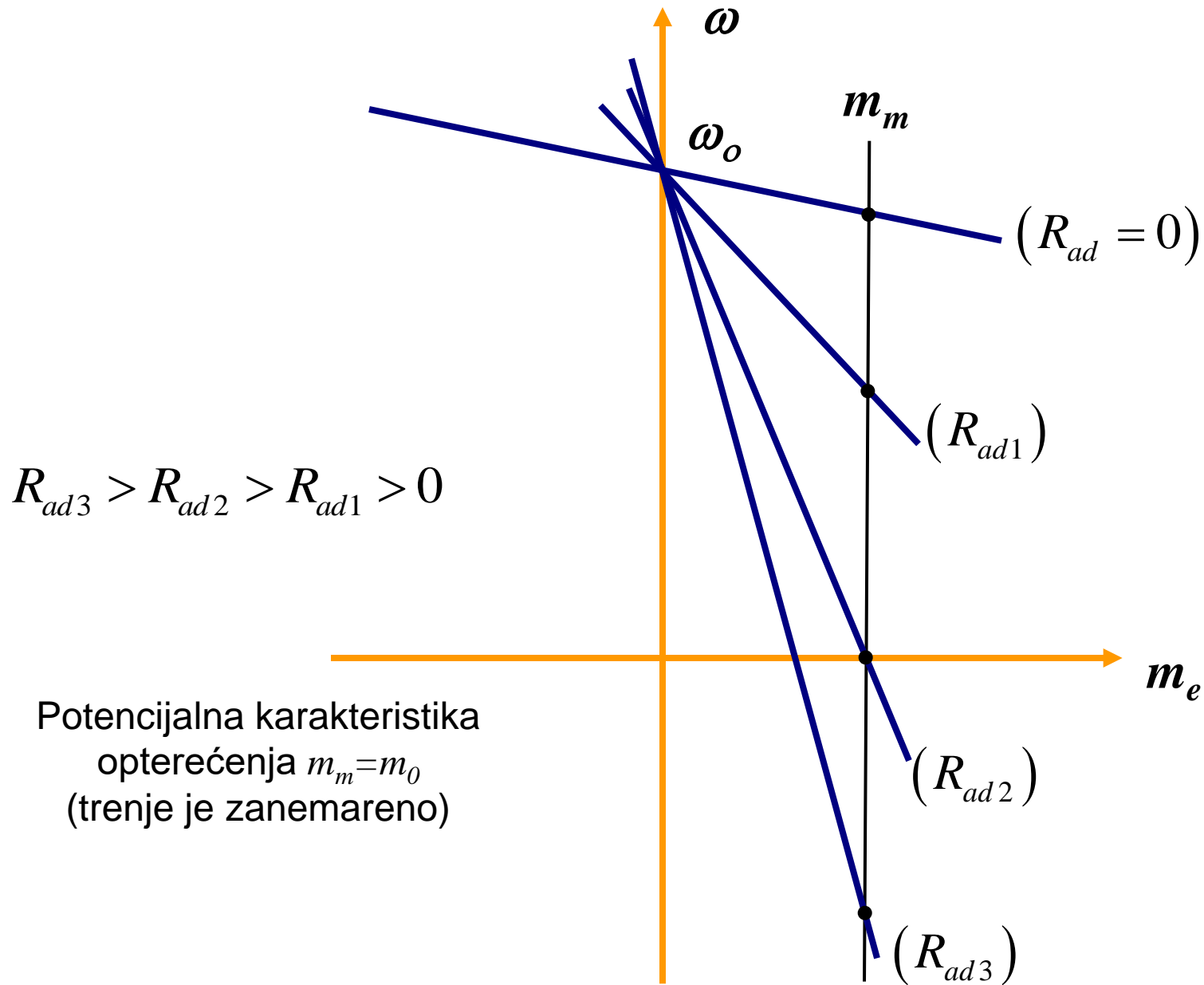
Odnos promena brzine usled opterećenja:

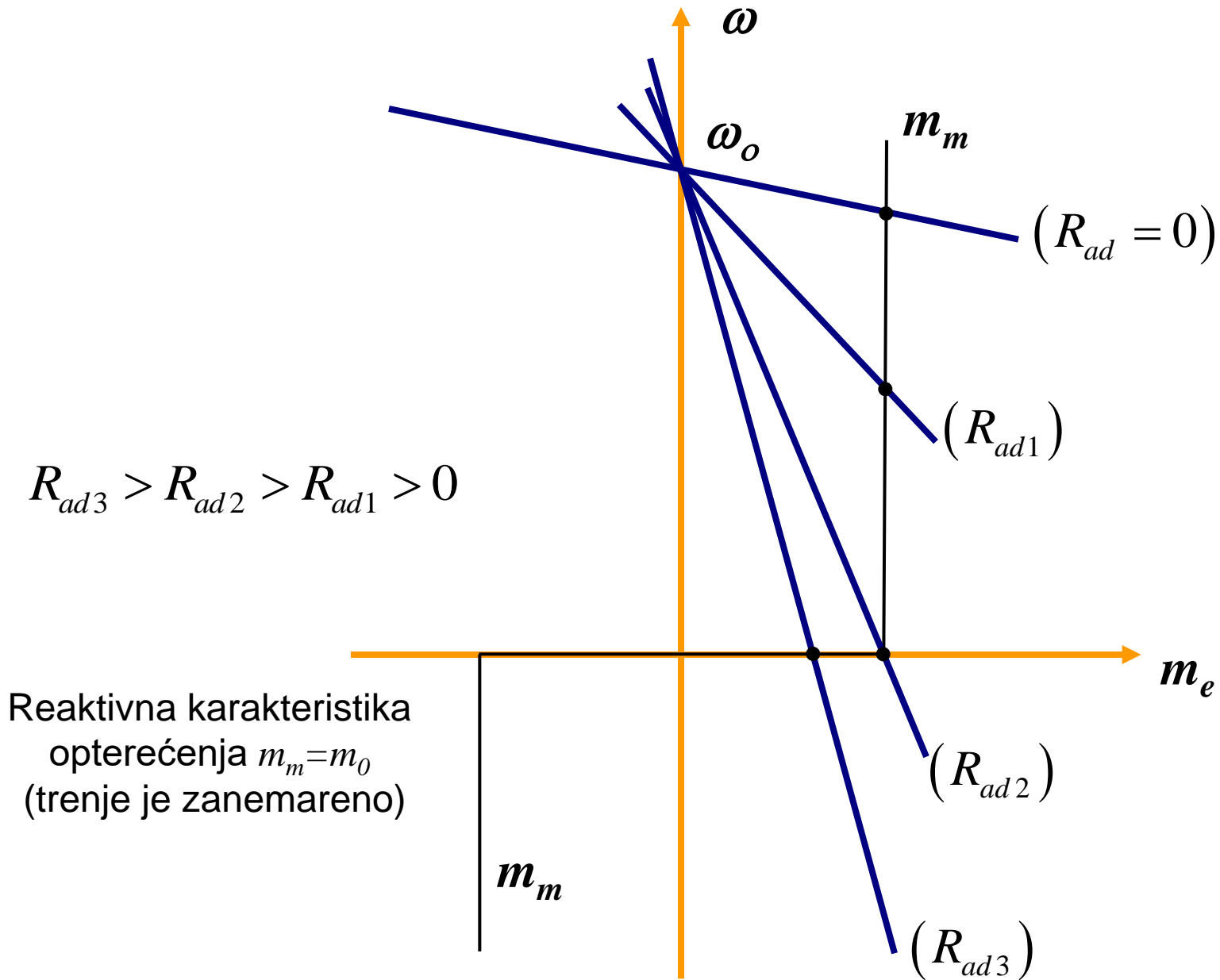
$$\frac{\Delta\omega'}{\Delta\omega_n} = \frac{R_a + R_{ad}}{R_a} = 1 + \frac{R_{ad}}{R_a} > 1$$

Za određeno opterećenje (m_m)

brzina motora zavisi od vrednosti dodatog otpora:

$$\omega(m_e = m_m) = \begin{cases} > 0 & \text{za } R_{ad} < \frac{\omega_0 \psi_f^2}{m_e} - R_a & (R_{ad1}) \\ = 0 & \text{za } R_{ad} = \frac{\omega_0 \psi_f^2}{m_e} - R_a & (R_{ad2}) \\ < 0 & \text{za } R_{ad} > \frac{\omega_0 \psi_f^2}{m_e} - R_a & (R_{ad3}) \end{cases}$$





UTICAJ PROMENE NAPONA INDUKTA NA OBLIK STATIČKIH KARAKTERISTIKA

Pri konstantnoj pobudi motora ($\psi_f = \text{const}$) statičke karakteristike:

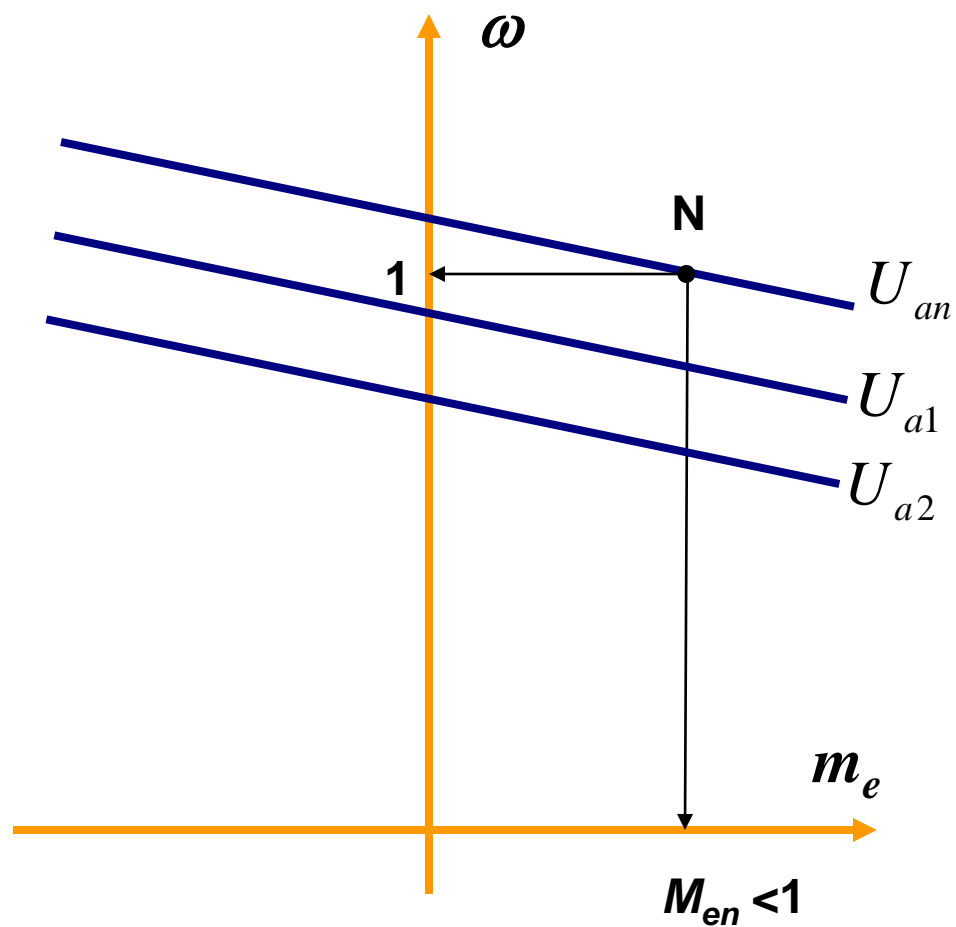
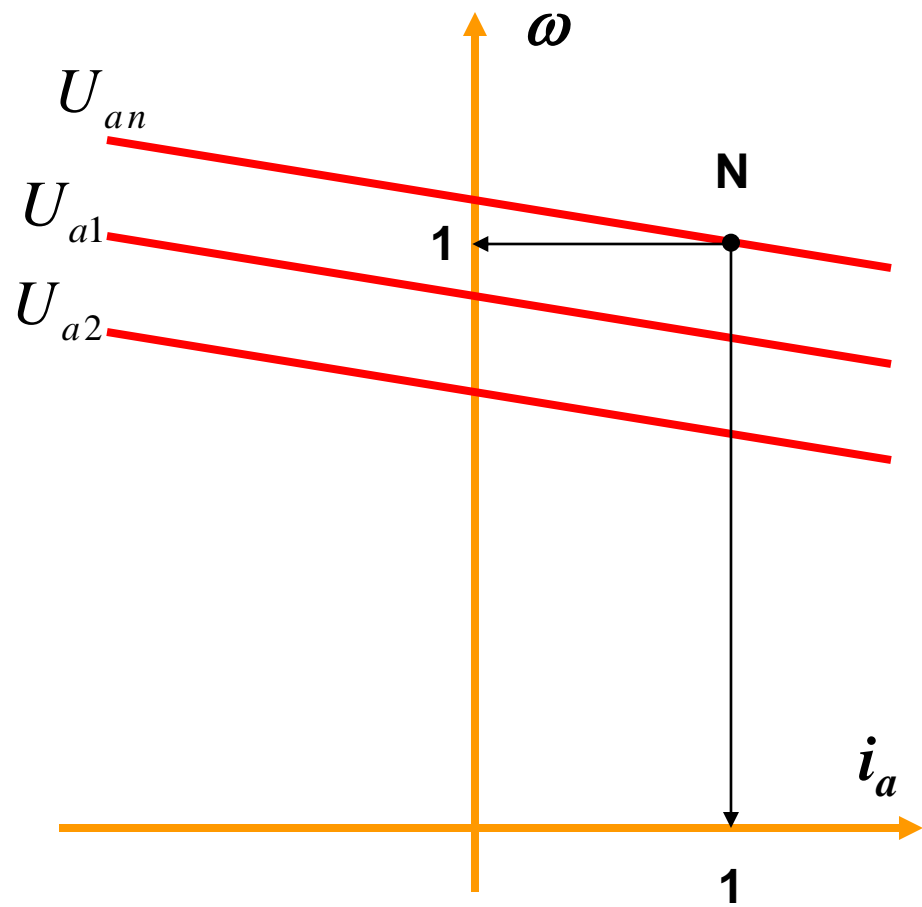
$$\omega_i = \omega(i_a) \quad \text{i} \quad \omega_m = \omega(m_e)$$

Važne napomene:

1. uobičajeno je $-1 < u_a < 1$;
2. uobičajeno je $\psi_f = \psi_{fn}$;
3. posmatra se opseg promene opterećenja u kome magnetna reakcija indukta ne dolazi do izražaja (do M_{mmax}). Ovaj opseg određen je maksimalno dozvoljenom strujom motora (komutacijom) koja je u praksi

$$I_{a \max} \in (1,5 \div 2,5).$$

Prema tome: $M_{m \max} = M_{e \max} = \psi_{fn} \cdot I_{a \max} = \text{const.}$



$$U_{an} > U_{a1} > U_{a2}$$

UTICAJ PROMENE POBUDE NA OBLIK STATIČKIH KARAKTERISTIKA

Pri konstantnom naponu indukta ($u_a = U_{an} = \text{const.}$)
karakteristične vrednosti na mehaničkoj karakteristici su:

N: brzina idealnog praznog hoda, $\omega (m_e = 0)$

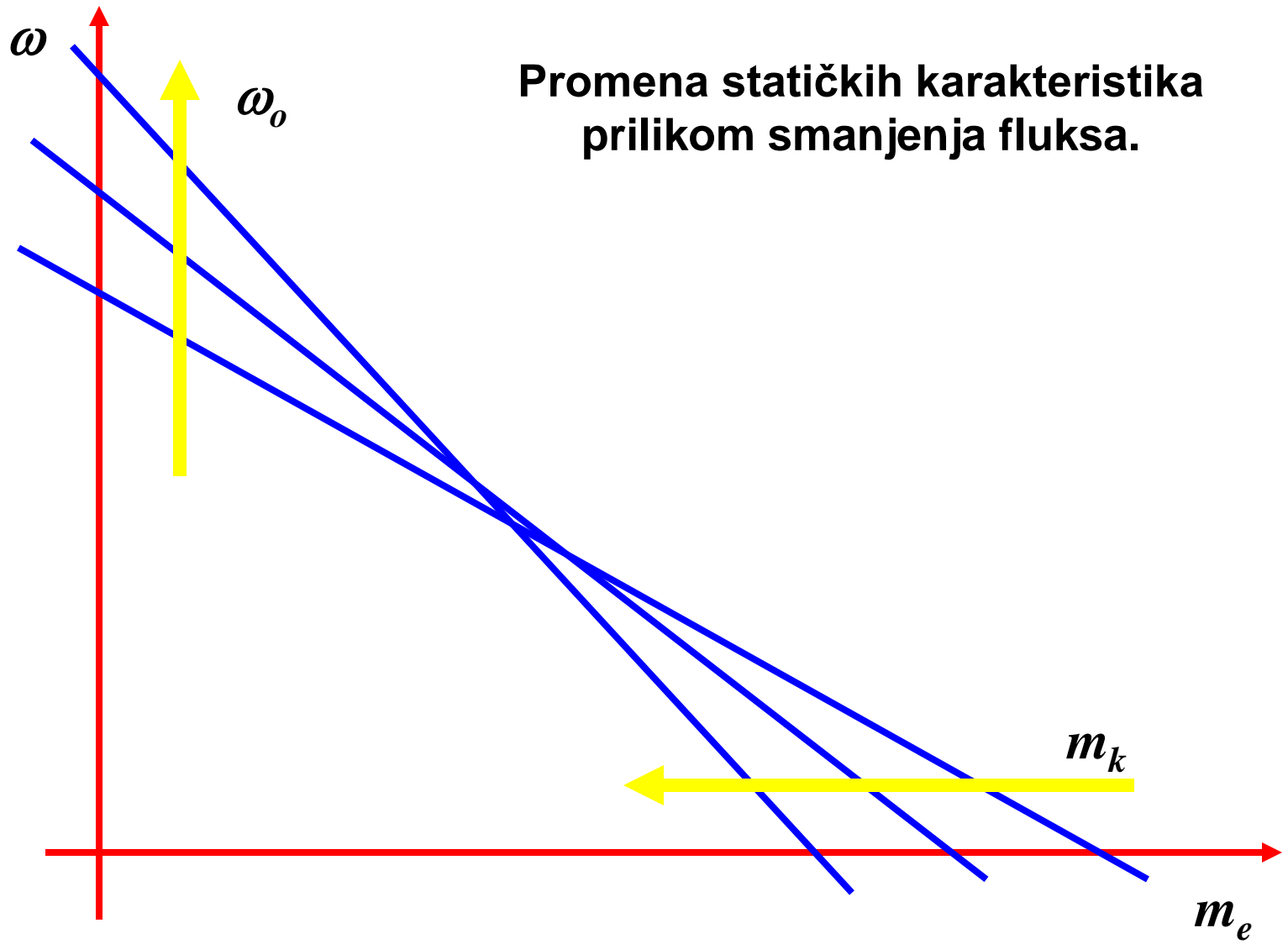
$$m_e = 0 \qquad \omega_0 = U_{an} / \psi_f = 1 / \psi_f$$

moment kratkog spoja, $m_e (\omega = 0)$

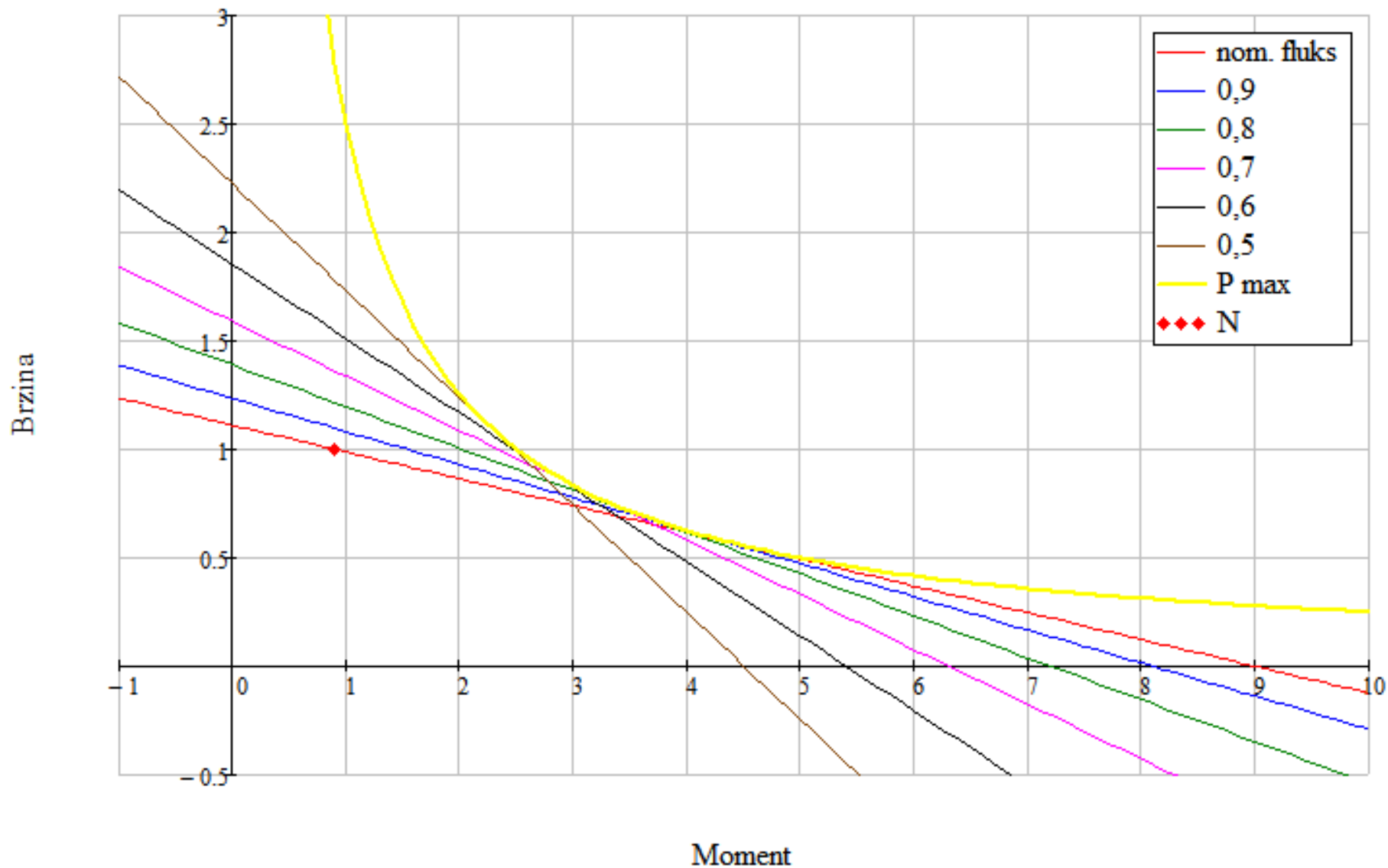
$$\omega = 0 \qquad m_k = U_{an} \cdot \psi_f / R_a = \psi_f / R_a$$

Napomena: Ova vrednost momenta kratkog spoja je fiktivna,
stvarna vrednost momenta kratkog spoja je znatno manja
zbog uticaja magnetne reakcije indukta.

Promena statičkih karakteristika
prilikom smanjenja fluksa.



Promena statičkih karakteristika prilikom smanjenja fluksa.



Kod promene pobude, maksimalni moment je funkcija fluksa:

$$M_{e \max} = \psi_f \cdot i_{a \max} = f(\psi_f)$$

smenom u $\omega_i (i_i)$ dobija se:

$$\omega_{\max}^{(s)} = \frac{(1 - R_a \cdot I_{a \max}) \cdot I_{a \max}}{M_{e \max}} \rightarrow \text{HIPERBOLA!!!!!!}$$

Maksimalna dozvoljena struja određuje oblast rada.

Za trajni rad u oblasti slabljenja polja, mora se voditi računa o zagrevanju mašine. U trajnom radu trebalo bi da struja indukta bude manja ili jednaka nominalnoj.

$$i_a \leq I_{an}$$

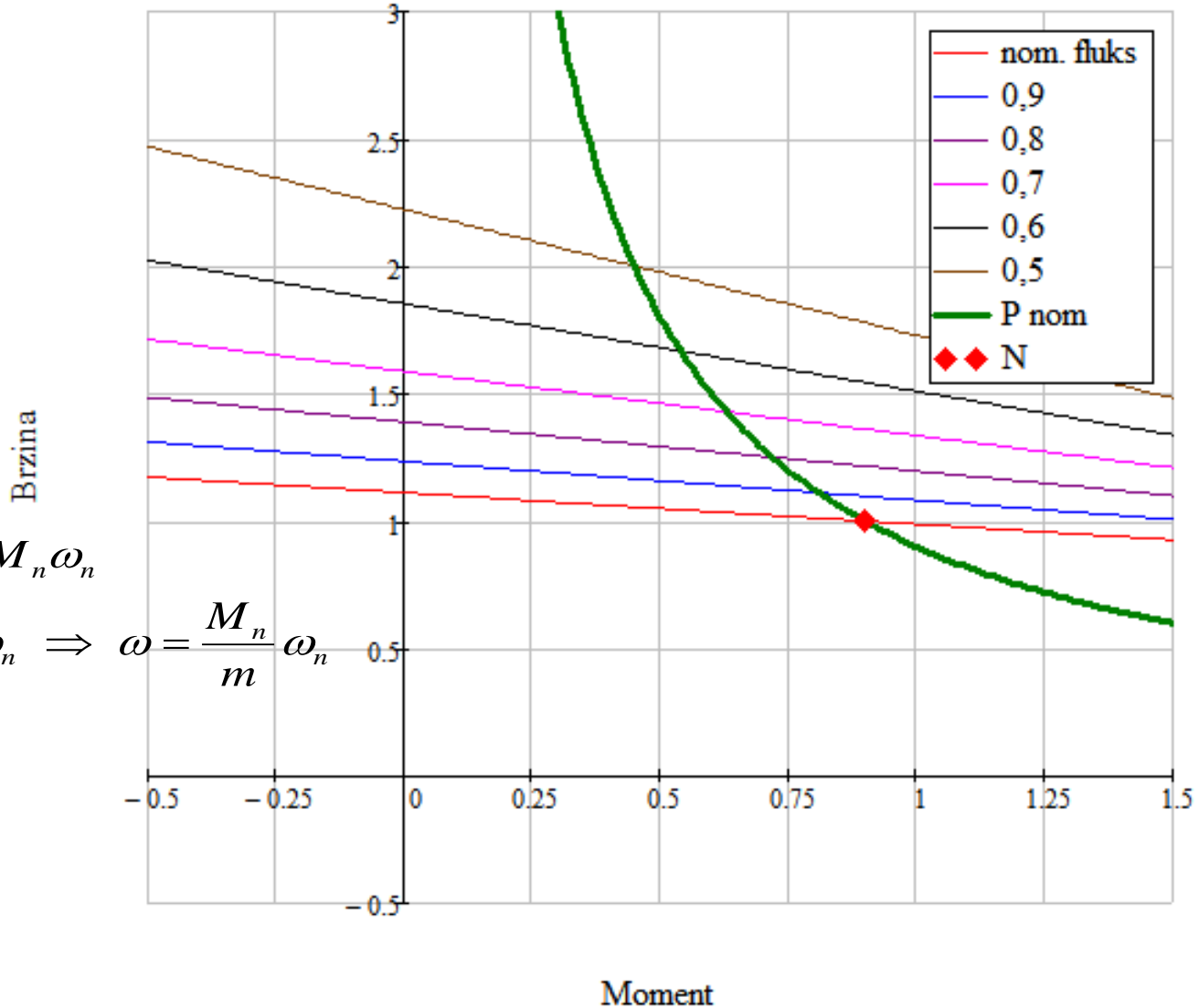
$$P_m = m_e \cdot \omega = \psi_f \cdot i_a \cdot \omega = e \cdot i_a = u_a \cdot i_a - R_a \cdot i_a^2$$

Promene statičke karakteristike prilikom smanjenja fluksa. Kriva konstantne snage.

$$P_{\max} = P_n = M_n \omega_n$$

$$m \cdot \omega = M_n \omega_n \Rightarrow \omega = \frac{M_n}{m} \omega_n$$

$$\omega = \frac{P_n}{m}$$



Polazeći od statičke karakteristike

$$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} m_e$$

uz uslov: $u_a = U_{an} = 1$

Promenu brzine u funkciji promene fluksa dobićemo rešavanjem jednačine:

$$\frac{d\omega}{d\psi_f} = -\frac{1}{\psi_f^2} + \frac{2R_a}{\psi_f^3} m_e = 0$$

Zamenom rešenja

$$\psi_{f \text{ ext}} = 2 \cdot R_a \cdot m_e \neq 0$$

u statičku karakteristiku, dobijamo maksimalnu brzinu pri smanjenju pobude

$$\omega_{\max} = \frac{1}{4 \cdot R_a \cdot m_e}$$

HIPERBOLA - OBVOJNICA !!!!

Mehanička snaga je tada maksimalna : $P_{m \max} = m_e \cdot \omega_{\max} = \frac{1}{4 \cdot R_a}$

Zbog konstruktivnih razloga brzina motora je ograničena:

$$\omega_{\max}^{(k)} \in (2 \div 3)$$

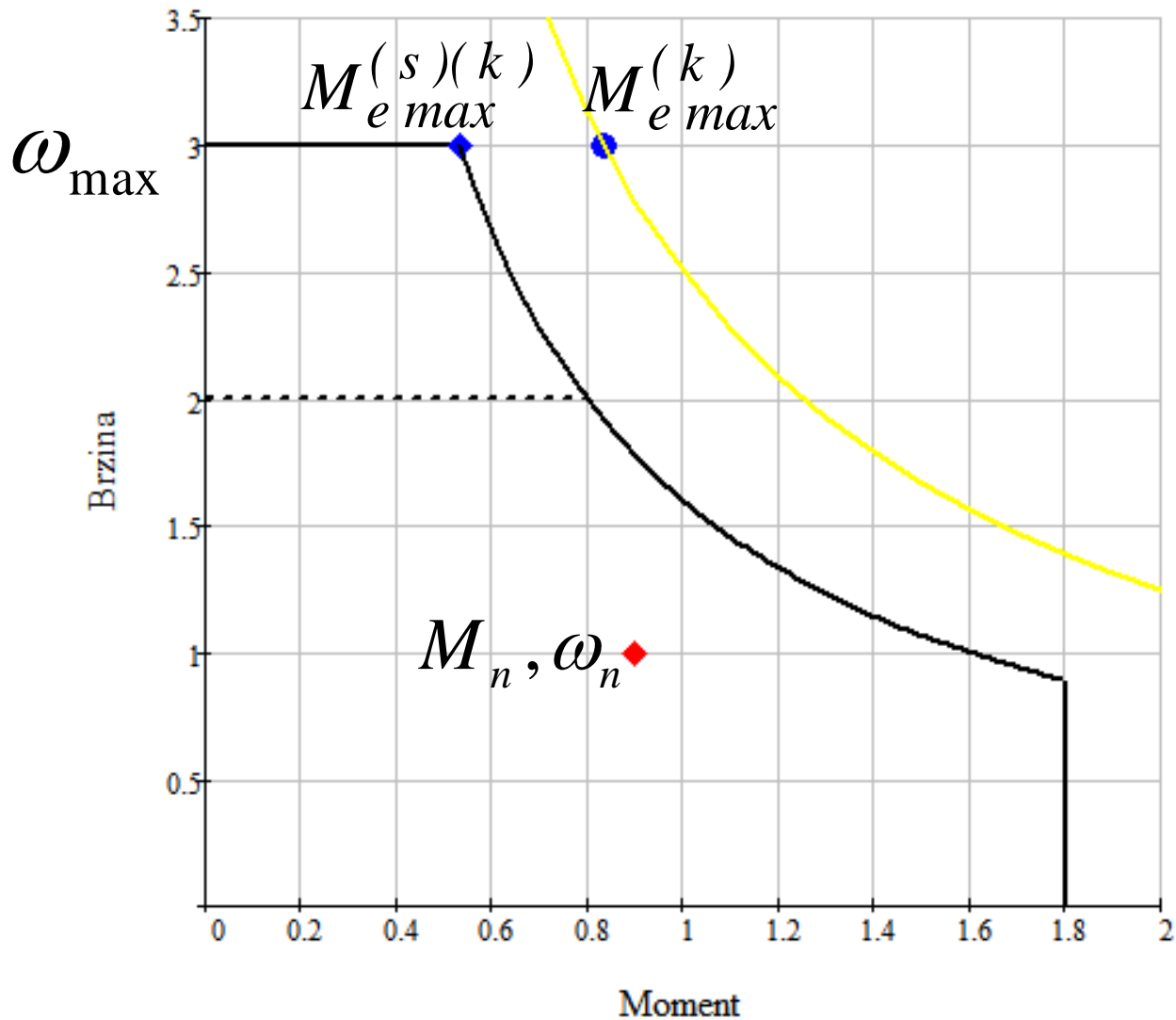
Pa dobijamo:

$$M_{e \max}^{(s)(k)} = \frac{(1 - R_a \cdot I_{a \max}) \cdot I_{a \max}}{\omega_{m \max}^{(k)}}$$

$$M_{e \max}^{(k)} = \frac{1}{4 \cdot R_a \cdot \omega_{m \max}^{(k)}}$$

Praktično ima smisla samo smanjivati fluks:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{E_n}{\omega_{\max}^{(k)}} = \frac{U_{an} - R_a \cdot I_{an}}{\omega_{\max}^{(k)}} \\ \text{ili} \\ \frac{E_{\min}}{\omega_{\max}^{(k)}} = \frac{U_{an} - R_a \cdot I_{a \max}}{\omega_{\max}^{(k)}} \end{array} \right\} = \psi_{f \min}, \quad \psi_{f \min} \leq \psi_f \leq \psi_{fn}$$



Crna linija

Granica mogućih radnih tačaka.

Žuta linija

Granica teorijski mogućih radnih tačaka.



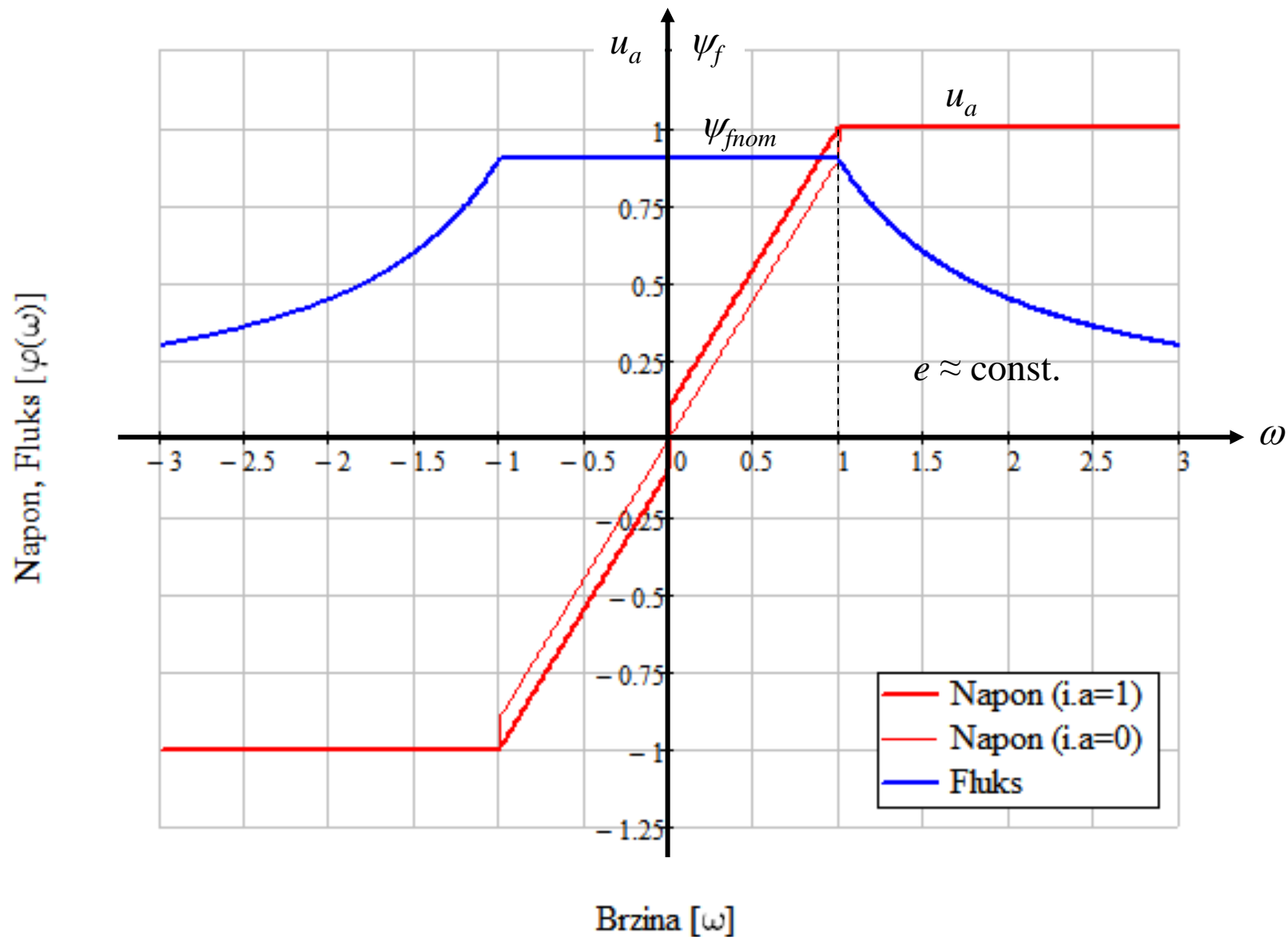
Momenti na maksimalnoj brzini



Nominalna radna tačka

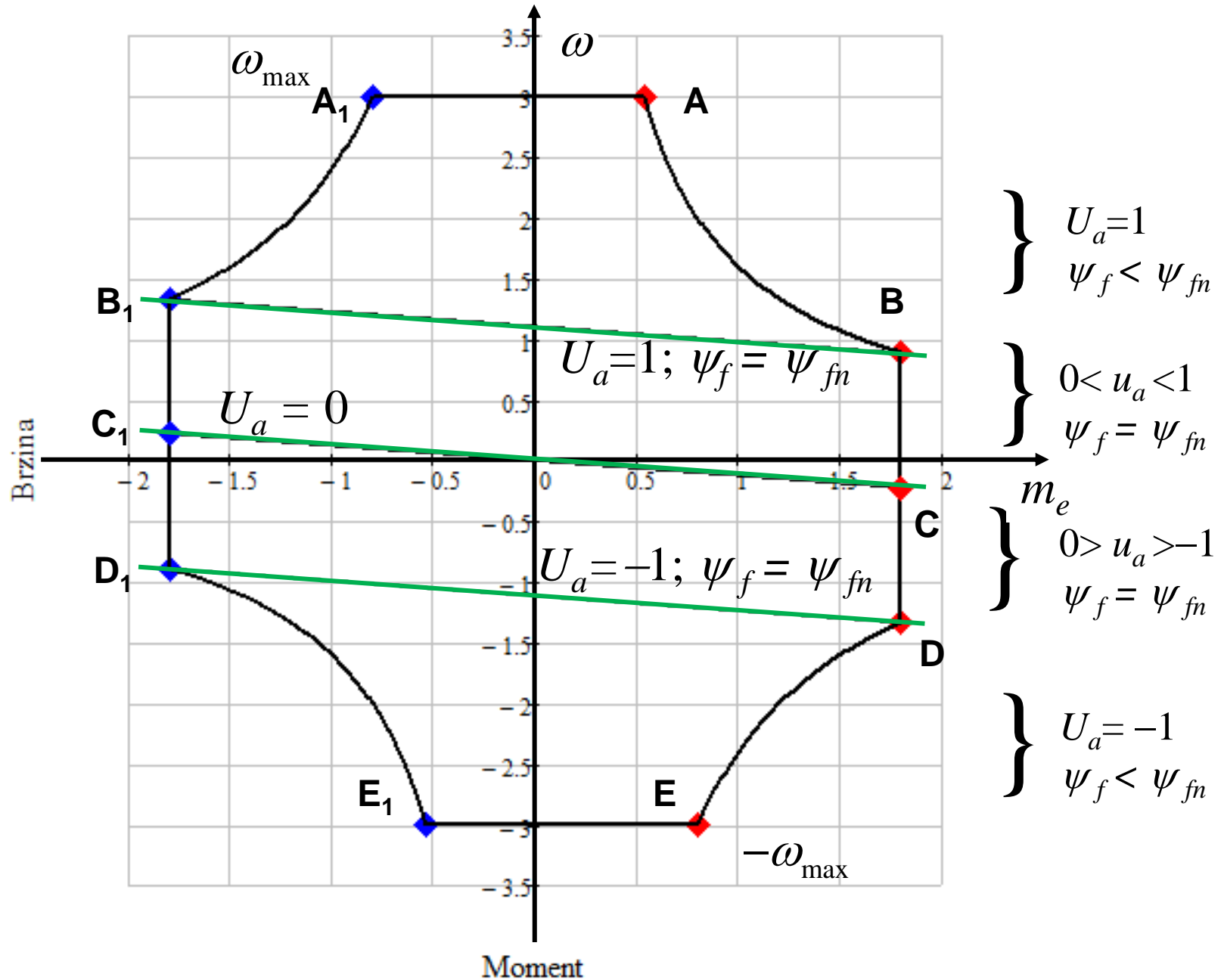
KOMBINOVANO UPRAVLJANJE (PROMENOM NAPONA INDUKTA I PREKO POBUDE)

N

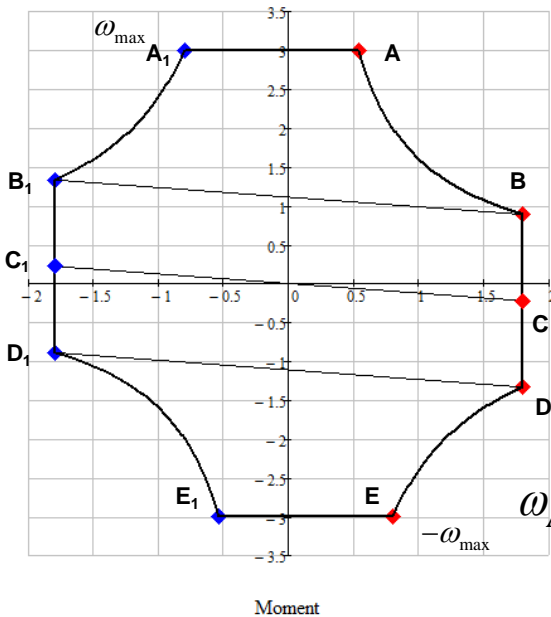


PODRUČJE MOGUĆIH RADNIH TAČKA U $(m_e; \omega)$ RAVNI.

N:



KOORDINATE KARAKTERISTIČNIH TAČKA U PODRUČJU MOGUĆIH RADNIH TAČKA U $(m_e; \omega)$ RAVNI NA PRIMERU.



Za $R_a = 0.1$, $I_{a \max} = 2$ i $\omega_{\max} = 3$:

$$U_{an} = 1, I_{an} = 1, \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, M_{en} = \psi_{fn} \cdot I_{an} = 0.9$$

A:

$$\omega_A = \omega_{\max}, \psi_A = \frac{(U_{an} - R_a \cdot I_{a \max})}{\omega_{\max}} = 0.267, M_A = \psi_A \cdot I_{a \max} = 0.533$$

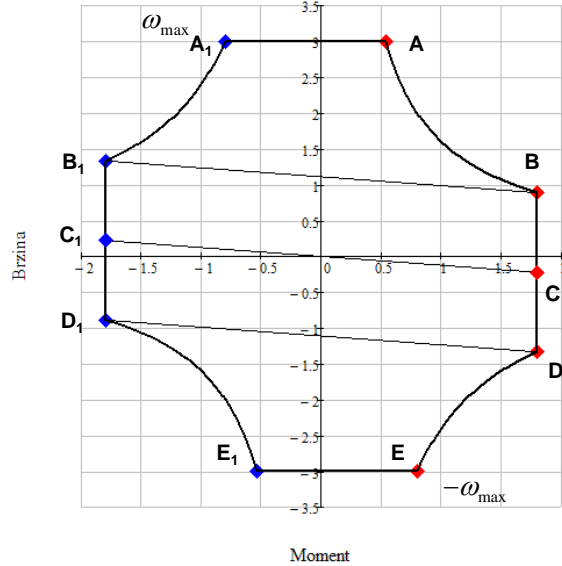
A₁:

$$\omega_{A_1} = \omega_{\max}, \psi_{A_1} = \frac{(U_{an} - R_a \cdot (-I_{a \max}))}{\omega_{\max}} = 0.4, M_{A_1} = \psi_{A_1} \cdot (-I_{a \max}) = -0.8$$

B:
$$\omega_B = \frac{U_{an} - R_a \cdot I_{a \max}}{\psi_{fn}} = 0.899, \psi_B = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, M_B = \psi_{fn} \cdot I_{a \max} = 1.8$$

B₁:
$$\omega_{B_1} = \frac{U_{an} - R_a \cdot (-I_{a \max})}{\psi_{fn}} = 1.33, \psi_{B_1} = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, M_{B_1} = \psi_{fn} \cdot (-I_{a \max}) = -1.8$$

KOORDINATE KARAKTERISTIČNIH TAČKA U PODRUČJU MOGUĆIH RADNIH TAČKA U $(m_e; \omega)$ RAVNI NA PRIMERU.



$$\mathbf{C:} \quad \omega_C = \frac{0 - R_a \cdot I_{a \max}}{\psi_{fn}} = -0.222, \quad \psi_C = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9,$$

$$M_C = \psi_{fn} \cdot I_{a \max} = 1.8$$

$$\mathbf{C_1:} \quad \omega_{C_1} = \frac{0 - R_a \cdot (-I_{a \max})}{\psi_{fn}} = 0.222, \quad \psi_{C_1} = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9,$$

$$M_{C_1} = \psi_{fn} \cdot (-I_{a \max}) = -1.8$$

$$\mathbf{D:} \quad \omega_D = \frac{-U_{an} - R_a \cdot I_{a \max}}{\psi_{fn}} = -1.33, \quad \psi_D = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, \quad M_D = \psi_{fn} \cdot I_{a \max} = 1.8$$

$$\mathbf{D_1:} \quad \omega_{D_1} = \frac{-U_{an} - R_a \cdot (-I_{a \max})}{\psi_{fn}} = -0.899, \quad \psi_{D_1} = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, \quad M_{D_1} = \psi_{fn} \cdot (-I_{a \max}) = -1.8$$

$$\mathbf{E:} \quad \omega_E = -\omega_{\max} = -3, \quad \psi_E = \frac{-U_{an} - R_a \cdot I_{a \max}}{\omega_{\max}} = 0.4, \quad M_E = \psi_E \cdot I_{a \max} = 0.8$$

$$\mathbf{E_1:} \quad \omega_{E_1} = -\omega_{\max} = -3, \quad \psi_{E_1} = \frac{-U_{an} - R_a \cdot (-I_{a \max})}{\omega_{\max}} = 0.267, \quad M_{E_1} = \psi_{E_1} \cdot I_{a \max} = -0.533$$